

TST 超前地质预报技术在贵州岩溶地区的应用

张 卿, 罗宗帆

(中铁二十局沪昆客专, 贵州 安顺 561000)

摘要: 为探索岩溶地区有效的超前预报技术方案, 结合岩溶区的地震波场特征, 尝试使用基于散射和反射混合模型的 TST 隧道超前预报技术进行地质超前预报。主要研究成果如下: 1) 基本查明斗磨隧道进口平导和大独山隧道 1# 横洞掌子面前方 150 m 预报范围内的地质情况; 2) 探明隧道掌子面前方岩溶裂隙、溶洞的分布范围、规模以及发育情况; 3) 预报的结果与实际情况基本一致, 为提前采取支护措施提供准确的地质依据。

关键词: 岩溶; 隧道地质超前预报; TST; 速度扫描; 方向滤波; 偏移成像

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.03.025

中图分类号: U 452.1⁺.1

文献标志码: B

文章编号: 1672-741X(2012)03-0398-06

Application of TST Advance Geology Prediction Technology in Karst Areas in Guizhou

ZHANG Qing, LUO Zongfan

(Management Department of Shanghai-Kunming Passenger Dedicated Railway, China Railway 20th Bureau,
Anshun 561000, Guizhou, China)

Abstract: TST advance geology prediction technology, which is based on the mixed model of scattering and reflecting, is adopted in the construction of tunnels in karst areas in Guizhou. Main study results are as follows: 1) The geological conditions 150 m ahead of the face of the parallel adit of the entrance section of Doumo tunnel and ahead of the face of No. 1 horizontal adit of Dadushan tunnel are obtained. 2) The distribution, scale and development of the karst fissures and karst caves ahead of the tunnel face are predicted. 3) The prediction results, which coincide with the actual geological conditions, provide accurate geological basis to take support measures in advance.

Key words: karst; advance geology prediction; TST; velocity scan; directional filter; migration imaging

0 引言

新建沪昆铁路是我国交通网中“五纵五横”运输大通道的重要组成部分,是长三角和珠三角等沿海经济发达地区向西南内陆地区进行经济辐射的主要轴线,在区域综合交通运输体系中作用很大。沪昆线西段主要位于云贵高原及其边缘过渡地带,区域范围内地质构造复杂,构造线密集,断层发育,有岩溶、煤层瓦斯和采空区、液化砂石、软质岩风化剥落等不良地质。

在隧道施工过程中,超前地质预报技术对于查清隧道不利地质条件、预报掌子面前方的地质构造及含水性、保障施工安全具有重要作用,已成为隧道施工必要的技术环节^[1-2]。基于地震反射理论的隧道超前地质预报技术,其预报长度大、工作效率高,得到了较广泛的应用^[3-4],但也存在一定的技术缺陷。对于大型断裂带和岩性分界面等地质,因其物性差异大,反射信

号强,使用基于反射理论的地质超前预报技术开展工作,难度相对较小^[5]。对于岩溶和围岩裂隙等小型地质构造的预报,基于反射理论的地质超前预报技术则难以发挥作用,误报率较高。在我国西南的岩溶区,大部分岩溶是以构造裂隙岩溶为主,断裂与构造裂隙发育^[6]。由于溶蚀、崩塌和冲蚀作用,岩溶形态复杂,多有部分填充。管道岩溶较发育,埋深大,形成地下暗河^[7]。这些岩溶形态复杂,体积小,表面极不规则,展布规模小于地震波长,对地震波难于形成有效的反射,地震波主要以散射形式传播。针对岩溶区地震场波的特征,利用散射波进行地质超前预报势在必行。散射波的传播规律、波场特征与反射波不同^[8-9],不能应用地震反射资料处理技术处理,需要应用针对散射波的专有的处理技术。TST 地质超前预报系统就是基于散

收稿日期: 2012-02-24; 修回日期: 2012-03-15

作者简介: 张卿(1985—),男,甘肃平凉人,2010年毕业于防灾科技学院地球物理学专业,本科,助理工程师,从事隧道监控量测和超前预报工作。

射地震成像技术的地质超前预报系统^[10-11]。本文利用基于散射理论的TST超前预报系统并综合地质雷达等其他预报方法,成功解决了岩溶地区地质超前预报的难题。

1 TST隧道地质超前预报技术

1.1 散射扫描成像技术

超前预报时,在隧道围岩中使用人工震源激发地震波,地震波向四面八方传播,遇到岩性变化界面、地质构造、岩溶和地表面等波阻抗变化界面时发生反射、散射与折射。

当地质界面尺度远大于地震波波长时,地震波的传播遵从层状介质中的反射理论,反射波能量大,并沿着反射角等于入射角的方向传播;当地质界面尺度小于地震波波长时,地震回波的传播遵从散射理论,散射波不再具有单一的方向,而是以散射点为中心向四面八方传播。与反射波相比,散射波的能量较弱,频率偏高。

在实际地质条件下,既有如岩性界面、断层和地表面等大尺度的反射界面,也有如岩溶、采空区和孤石等小尺度离散地质体(见图1)。

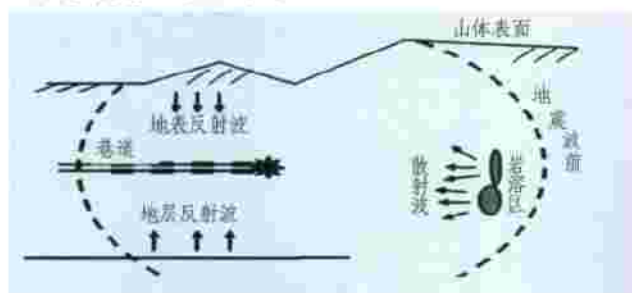


图1 隧道地质超前预报观测模型

Fig. 1 Advance geology prediction model of tunnel

采用反射与散射的混合模型(见图2),根据反射波及散射波的传播规律,分别将反射波和散射波进行偏移归位,得到隧道掌子面前方的真实地质情况,这是TST散射扫描技术的基本思想。关于TST地质超前预报系统数据处理的具体技术措施,如方向滤波、围岩速度分析、扫描成像等以及在数据采集时的观测系统已有相关文献^[9]进行了论述,此处不再介绍。

1.2 TST数据处理结果的解释原理

TST的波速图像与偏移图像的地质解释遵从如下原理:

1) 波速的分布可用于掌子面前方岩体的力学性状的推断。岩体波速高表示岩体结构完整致密,弹性模量高;波速低表示岩体破碎,裂隙含水。

2) 构造偏移图像表示地质结构的组合图像和地层性质的变化。构造偏移图像中反射条纹密集的地段,结构复杂、构造发育,在波速图像中对应位置为低

波速带;构造条纹少的地段,围岩均匀致密,在波速图像中对应位置为高波速带。

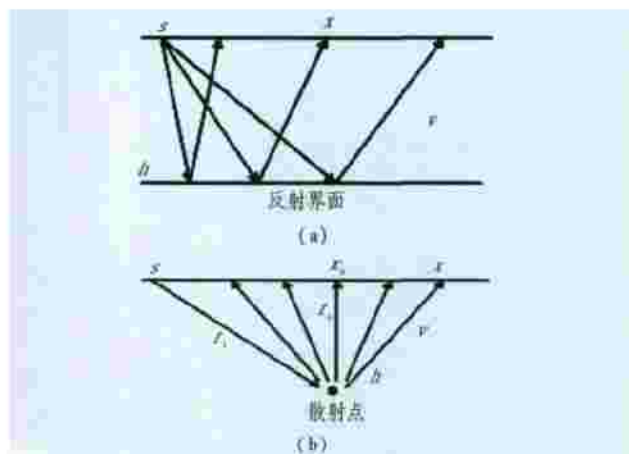


图2 反射与散射混合理论模型

Fig. 2 Mixed model of scattering and reflecting

3) 对岩体含水性的预报要结合水文地质资料。如果隧道标高在地下水位之下,则可判断断裂带和破碎岩体富含地下水;如果隧道标高在地下水位之上,则断裂带和破碎岩体可能含少量水或季节性含水。

4) 偏移图用蓝红表示软硬岩体界面。红色线条代表正的波速异常,表示波速由低变高、岩体由软变硬的界面;蓝色线条代表负的波速异常,表示波速由高变低、岩体由硬变软的界面;先蓝后红线条的组合代表存在一个断裂带;红蓝条纹密集出现区域代表地质现象中的断裂带或溶洞。断裂的展布范围大,在偏移图像上显示为较大范围的红蓝条纹延伸(见图3(a));溶洞的反射面不规则,在偏移图像上显示为红蓝条纹的延伸长度短(见图3(b))。

2 应用实例

2.1 斗磨隧道进口平导

斗磨隧道位于贵州省关岭自治县境内,地处云贵高原构造剥蚀中低山区,区内地形起伏,隧址区内最高点位于隧道轴线南侧的山顶,海拔2454.3m;最低点位于隧道出口南侧的河谷中,海拔1142m,相对高差为1312.3m。隧道穿越区域以碳酸盐、含煤地层分布为主要特征,具有剥蚀-溶蚀槽谷地貌特点。

隧址区基岩大多裸露,隧道进出口及缓坡地带分布有少量覆土,隧道区地表水以山间沟水为主,水量较小,雨季时沟内水量明显增加。地下水主要为第四系松散土层空隙水、基岩裂隙水和岩溶水。不良地质现象主要为岩溶及岩溶水、煤层瓦斯及采空区、危岩落石等,特殊岩土为石膏。斗磨隧道是铁道部重点工程,瓦斯含量高,被列为沪昆全线的I级风险隧道。本次重点对斗磨隧道进口平导D1K841+495掌子面前方150m的地质情况进行预报。

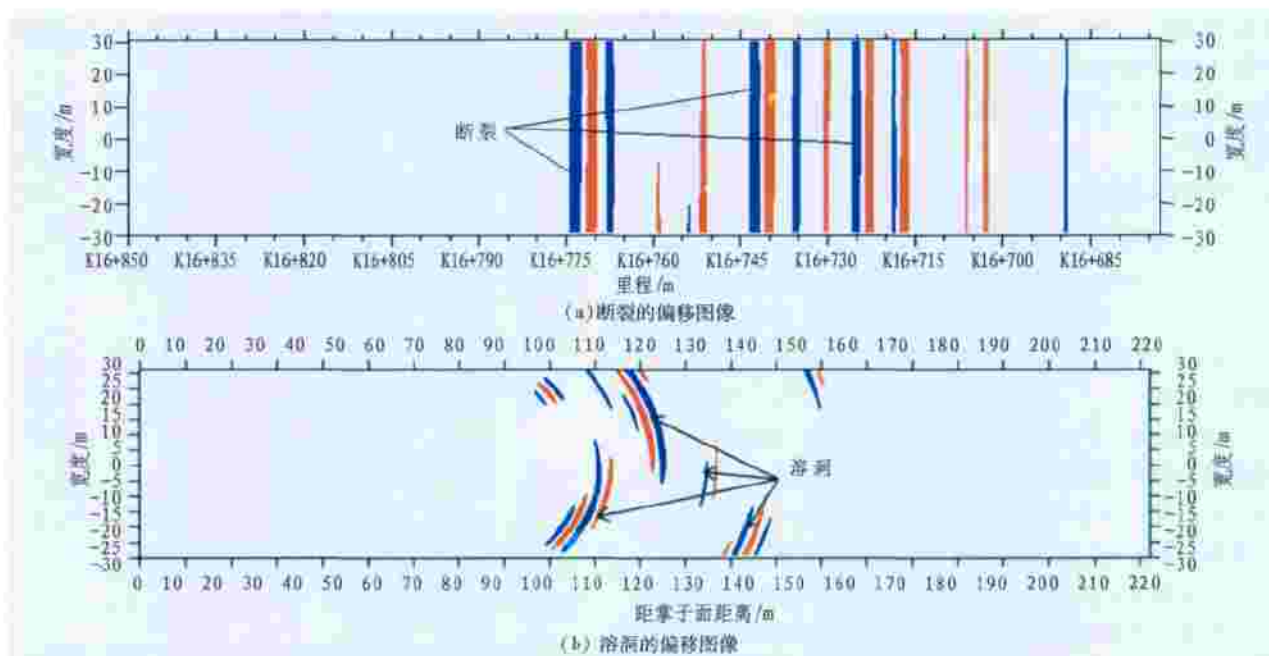


图3 偏移图像特点

Fig. 3 Typical migration image for karst cavity

2.1.1 TST 数据处理结果及地质解释

通过 TST 数据处理中地震数据导入、坏道剔出、带通滤波、干扰信号消除、观测坐标编辑和二维方向滤波等步骤,经全局扫描和分段扫描,得到预报地段围岩

的速度分布(见图4)。

使用前方回波地震数据和分析得到的速度分布,进行深度偏移成像,得到如图5所示的 TST 构造深度偏移成像。

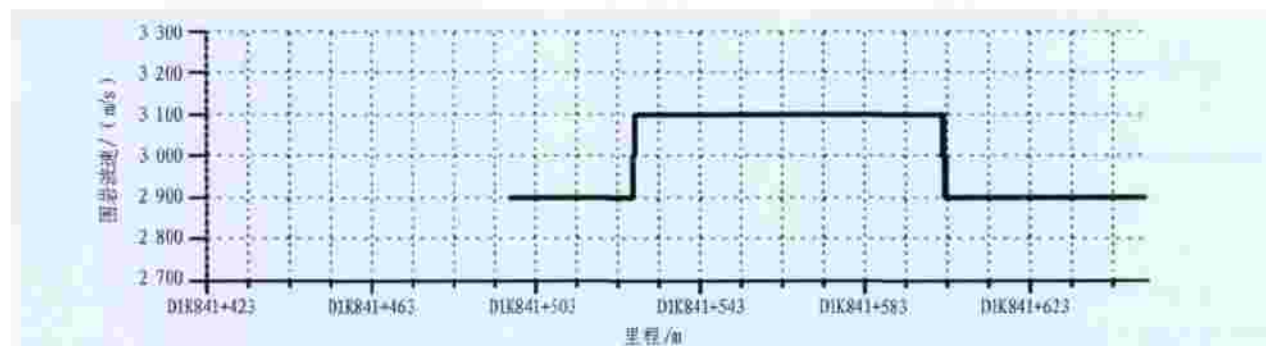
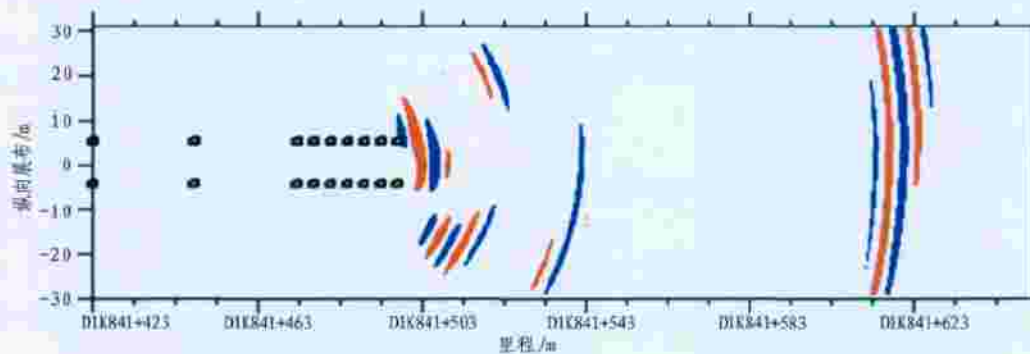


图4 斗磨隧道进口平导速度曲线

Fig. 4 Velocity of seismic wave in parallel adit of entrance section of Doumo tunnel



黑色小框为检波器孔和爆破孔布置点。

图5 斗磨隧道进口平导地质构造偏移成像

Fig. 5 Migration imaging of geological structures of parallel adit of entrance section of Doumo tunnel

利用图4和图5并结合地质资料分析,斗磨隧道进口平导 D1K841+495 掌子面前方 150 m 地质情况可划分为3段,具体预报结果见表1。

表1 斗磨隧道进口平导 TST 地质超前预报结果

Table 1 TST advance geology prediction results of parallel adit of entrance section of Doumo tunnel

里程	长度/ m	波速/ (km/s)	探测结果推断
D1K841+495 ~ +526	31	2.9	在构造偏移图上呈现红蓝组合,围岩稳定性和完整性较差,裂隙较发育,岩体较破碎,分析存在溶洞或破碎带。围岩为 IV 级
D1K841+526 ~ +603	77	3.1	围岩稳定性和完整性较好,裂隙稍发育。围岩为 III 级
D1K841+603 ~ +645	42	2.9	在构造偏移图上呈现红蓝组合,围岩稳定性和完整性较差,裂隙较发育,岩体较破碎,分析存在断层或软弱夹层。围岩为 IV 级

根据表1预报结果,建议在施工过程中:1)对围岩稳定性和完整性较差—差的地段加强支护;2)在 D1K841+495 ~ +526 和 D1K841+603 ~ +645 段采用地质雷达、红外探水仪或加深炮眼方法对掌子面前方地质灾害体分布和地下水情况进行探测;3)必要时,采用多功能钻机进行超前钻探。

2.1.2 超前水平钻探测结果与 TST 结果对比验证

根据超前地质预报结果,在掌子面进行了超前水平钻探测,探测结果为:里程 D1K841+506 ~ +517 处存在较大溶洞,且有黏土和淤泥等填充物;里程 D1K841+517 ~ +538 处钻杆推进速度忽快忽慢,钻孔处水为黑色,且带煤气味,初步判断此区段可能存在煤层。

通过相互对比验证 TST 预报结果与超前水平钻探测结果,可以说明:1)根据表1预报结果所作的施工建议是合理的;2)在 D1K841+495 ~ +526 段附近围岩稳定性和完整性较差,裂隙较发育,岩体较破碎,分析

存在溶洞或破碎带,与超前水平钻探测结果基本符合。

2.2 大独山隧道 1[#]横洞

大独山隧道全长 11 882 m (单洞双线隧道),进口里程为 DK852+772,出口里程为 DK864+654,隧道可能存在的岩溶长为 9 063 m (占全隧长度的 76%)。大独山隧道位于地处黔西高原向黔中丘陵过渡地带,属构造剥蚀和溶蚀中低山地貌,总体来看,地势北西高南东低,具构造剥蚀—溶蚀地貌特点。

大独山隧道洞身断层破碎带发育,区域断层有 7 处,物探解译断层有 11 处,下穿 1 处暗河(位于隧道拱顶上约 43 m),部分隧道处于水平循环带内,部分处于季节交替带,洞内为人字坡。该隧道地质复杂,为 I 级风险隧道。

2.2.1 TST 数据处理结果及地质解释

通过 TST 数据处理流程处理后,得到大独山隧道 1[#]横洞 H1D1K0+808 掌子面前方 150 m 的地质体围岩波速曲线图(见图6)。

使用前方回波地震数据和分析得到的速度分布,进行深度偏移成像,得到如图7所示的 TST 构造深度偏移成像。

对比图6和图7,结合掌子面开挖情况和地质资料综合分析,得到大独山隧道 1[#]横洞 TST 地质超前预报结果(见表2)。

根据表2预报结果,建议在 H1D1K0+808 ~ +760 段加强支护并采用地质雷达、红外探水仪或加深炮眼方法对掌子面前方地质灾害体分布和地下水情况进行探测。

2.2.2 地质雷达探测结果与 TST 结果对比验证

根据超前地质预报结果,采用短进尺向前开挖,发现向前开挖的岩体逐渐破碎并伴随有裂隙水出现。开挖到 H1D1K0+784,在掌子面进行了地质雷达探测,探测结果主要有 2 点。

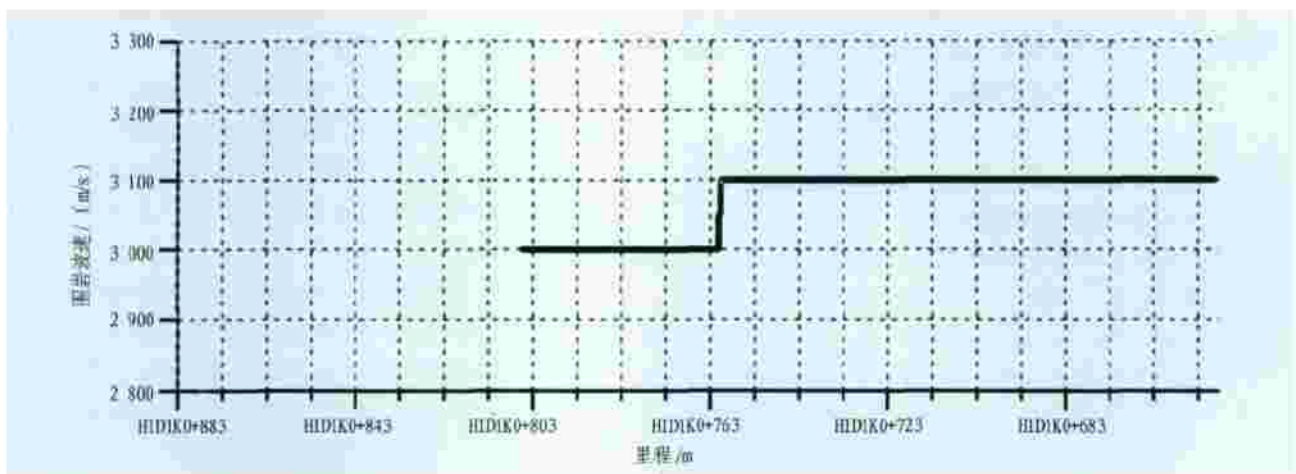


图6 大独山隧道 1[#]横洞速度曲线

Fig. 6 Velocity of seismic wave at No. 1 horizontal adit of Dadushan tunnel

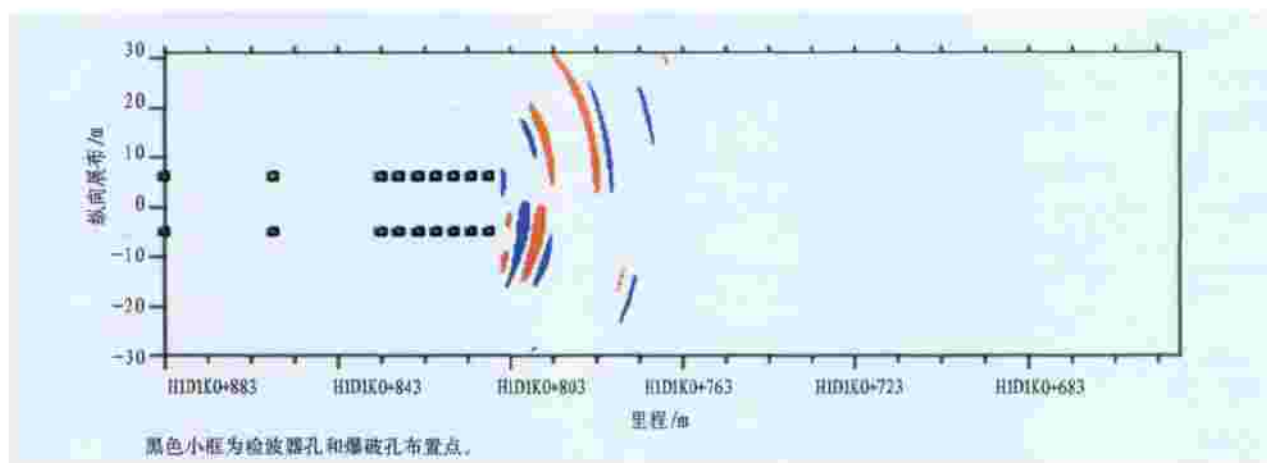


图7 大独山隧道1#横洞地质构造偏移成像

Fig. 7 Migration imaging of geological structures of No. 1 horizontal adit of Dadushan tunnel

表2 大独山隧道1#横洞 TST 地质超前预报结果

Table 2 TST advance geology prediction results of No. 1 horizontal adit of Dadushan tunnel

里程	长度/ m	波速/ (km/s)	探测结果推断
HIDIK0 + 808 ~ +760	48	3.0	在构造偏移图上呈现红蓝组合, 围岩稳定性和完整性较差, 岩溶裂隙较发育, 岩体较破碎, 有水, 在隧道中轴线右侧, 疑存有充填型岩溶裂隙, 围岩为 IV 级
HIDIK0 + 760 ~ +658	102	3.1	围岩稳定性和完整性好, 裂隙稍发育, 围岩为 III 级

1) 在掌子面前方 0 ~ 10 m 内电磁波反射信号较强, 频率中等, 同相轴较为连续, 有断续。判断此区段内岩层较破碎, 含水, 可能有夹层。

2) 在掌子面前方 10 ~ 30 m 内电磁波反射信号较强, 频率中等, 同相轴较为连续, 有断续。判断此区段内岩层裂隙发育, 局部为破碎带或填充物, 含水, 可能有夹层。

通过 TST 预报结果与实际开挖情况、地质雷达探测结果的相互对比印证, 可以看出预报结果与地质雷达结果基本符合, 说明 TST 预报结果是准确的, 根据表 2 预报结果所作的建议是合理的。

3 结论与经验

在岩溶发育等地质构造复杂地区进行的超前预报工作一直是超前预报领域的难题。利用 TST 超前地质预报技术能够对掌子面前方地质情况进行有效、准确地预报, 克服了仅基于反射理论的超前预报技术 (如 TSP 造成的误报和漏报问题)。

在沪昆客专贵州段的多次超前预报工作中, TST 隧道超前地质预报查明了掌子面前方 150 m 预报范围内的地质情况, 对岩溶裂隙、溶洞的分布范围、规模以及发育情况的预报与实际情况基本一致, 为提前采取支护措施提供了准确的地质依据, 避免了工程事故的

发生。

TST 方法在岩溶地区的数据处理比较灵活, 需要掌握好偏移图像和速度扫描曲线的对应关系。在实践中不断积累经验, 就能得到比较理想的预报结果。在 TST 操作中有如下经验:

1) 速度扫描过程分整体扫描和分段扫描 2 个步骤。整体扫描可以快速地把握预报地段围岩波速的分布特点, 包括最优波速、次优波速和速度大致分段特点。

2) 整体扫描的第 1 个目的是寻找最优和次优波速。速度扫描中会出现几个能量高的极值点, 其中能量最高的点对应的波速为最优波速, 它表示有较长地段的围岩适合该速度; 能量次高的点对应的波速为次优波速, 它代表有较短地段的围岩适合该波速 (一般选择 1 ~ 2 个次优波速)。整体速度扫描中速度步长一般选为 200 m/s。

3) 整体扫描的第 2 个目的是确定围岩波速分段, 这是整体扫描最主要的任务。波速分段的原则是依据扫描中能量极值点的多少来决定; 最优波速对应的分段长, 次优波速对应的分段短。

4) 判断扫描中最优和次优波速适合的地段是依据偏移图像叠加的效果。偏移图像中速度适合的地段反射界面连续性好, 叠加能量大, 红蓝线条相间分布。如果速度选择偏低, 将出现过多的蓝色条纹, 反之将出现过多的红色条纹。

5) 按照上述原则, 首先寻找最优波速适合的较长地段, 然后再逐次寻找次优波速适合的地段。整体扫描中分段的主要目的是确定最优、次优 1 和次优 2 等各波速分布的前后次序, 分段的具体位置需要在分段扫描阶段来确定。

建议逐渐建立典型地质条件的偏移图像样本库, 方便初学者利用前人的经验进行地质状况判读。

参考文献(References):

- [1] 赵永贵. 中国工程地球物理研究的进展与未来 [J]. 地球物理学进展, 2002, 17 (2): 122 - 126. (ZHAO Yonggui. The present situation and future of engineering geophysics in China [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17 (2): 122 - 126. (in Chinese))
- [2] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (3): 101 - 105. (ZHAO Yonggui, LIU Hao, SUN Yu, et al. Research progress in tunnel geological prediction [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18 (3): 101 - 105. (in Chinese))
- [3] 钟宏伟, 赵凌. 我国隧道工程超前预报技术现状分析 [J]. 人民长江, 2004, 35 (9): 16 - 18, 37, 60. (ZHONG Hongwei, ZHAO Ling. Analysis of status-quo of forward prediction technology of Chinese tunnel works [J]. Yangtze River, 2004, 35 (9): 16 - 18, 37, 60. (in Chinese))
- [4] 李志祥, 何振起, 刘国伍. TSP - 203 在大支坪隧道超前预报中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20 (2): 198 - 201. (LI Zhixiang, HE Zhenqi, LIU Guowu. The application of TSP - 203 system in prediction of Dazhiping tunnel [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20 (2): 198 - 201. (in Chinese))
- [5] 刘玉山, 陈建平. TRT 技术在乌池坝隧道超前预报中的应用 [J]. 铁道建筑, 2008 (9): 62 - 64.
- [6] 牟元存, 王光权, 王树祚. TSP203 在灰岩地区隧道施工过程中应用与探索 [J]. 工程地球物理学报, 2010 (2): 55 - 62. (MU Yuancun, WANG Guangquan, WANG Shudong. Application of TSP203 to limestone areas of tunnel construction [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010 (2): 55 - 62. (in Chinese))
- [7] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见 [J]. 铁道勘察, 2004 (1): 9 - 11, 20. (WANG Mengshu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district [J]. Railroad Survey, 2004 (1): 9 - 11, 20. (in Chinese))
- [8] 赵永贵, 蒋辉. 隧道地震超前预报技术现状分析与新进展 [J]. 公路隧道, 2010 (1): 4 - 10.
- [9] Otto R, Button E, Bretterebner H, et al. The application of TRT-tree reflection tomography at the unterwald tunnel [J]. Geophysics, 2002 (2): 51 - 56.
- [10] 赵永贵, 蒋辉, 赵晓鹏. TSP203 超前预报技术的缺陷与 TST 技术的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2008, 5 (3): 15 - 22. (ZHAO Yonggui, JIANG Hui, ZHAO Xiaopeng. The technical bug of TSP203 and application of TST technique [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5 (3): 15 - 22. (in Chinese))
- [11] 肖启航, 谢朝娟. TST 技术在贵州高速公路顶效隧道超前地质预报中的应用 [J]. 工程勘察, 2010 (7): 92 - 97. (XIAO Qihang, XIE Chaojuan. Application of TST approach to the advanced geological prediction for Dingshao tunnel in Guizhou highway [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010 (7): 92 - 97. (in Chinese))

(上接第397页)

- [2] 李国良. 乌鞘岭隧道辅助坑道的设置 [J]. 现代隧道技术, 2006, 43 (2): 38 - 43. (LI Guoliang. Design and construction of the access shafts and drifts [J]. Modern Tunneling Technology, 2006, 43 (2): 38 - 43. (in Chinese))
- [3] 冯仁科. 论公路隧道辅助坑道的设计 [J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19 (36): 169 - 171. (FENG Renke. Discussion on the design of service galleries of highway tunnel [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2009, 19 (36): 169 - 171. (in Chinese))
- [4] 李金城. 关角铁路隧道辅助坑道设计 [J]. 现代隧道技术, 2009, 46 (1): 1 - 7. (LI Jincheng. Design of access tunnels for Guanjiiao super-long tunnel [J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46 (1): 1 - 7. (in Chinese))
- [5] 王勇, 吴建福. 肖家梁隧道辅助坑道变更方案的比选与分析 [J]. 路基工程, 2010, 153 (6): 184 - 187. (WANG Yong, WU Jianfu. Comparison and analysis of auxiliary gallery programs of Xiaojialiang tunnel [J]. Subgrade Engineering, 2010, 153 (6): 184 - 187. (in Chinese))
- [6] 沈捷. 地铁竖井设计方案研究 [J]. 隧道建设, 2009, 29 (2): 194 - 205. (SHEN Jie. Study on design scheme of vertical shafts of Metro works [J]. Tunnel Construction, 2009, 29 (2): 194 - 205. (in Chinese))
- [7] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [8] 中铁工程设计咨询集团有限公司. GDK29 + 530 ~ GDK32 + 717.965 矿山法区间隧道主体结构设计图 SD - 05 - 04 - 02 [R]. 北京: 中铁工程设计咨询集团有限公司, 2010.
- [9] GB 50086—2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [10] TB 10121—2007 铁路隧道监控量测技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [11] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司. 广东珠三角莞惠城轨道交通土建暗挖隧道监测报告 [R]. 成都: 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [12] 中铁工程设计咨询集团有限公司. 莞惠城际时速 160 公里/时速 200 公里矿山法单线区间隧道参考图 SD - CK - 01 [R]. 北京: 中铁工程设计咨询集团有限公司, 2010.